

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh separačního kondenzátoru pro demonstrační jednotku
Flexibilního energetického systému**

**Proposal of Separative Condenser for Demonstration Union of
Flexible Energy System**

Student :

Bc. Adam Gavala

Vedoucí diplomové práce :

Doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Gavala**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Návrh separačního kondenzátoru pro demonstrační jednotku
Flexibilního energetického systému
Proposal of Separative Condenser for Demonstrational Union of Flexible
Energy System**

Zásady pro vypracování:

Navrhněte separační kondenzátor pro uvedenou demonstrační jednotku

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Rešerši FES se zaměřením na spalování fosilních paliv
2. Potřebné výpočty spalin a parovzduchové směsi
3. Schéma zapojení jednotky
4. Tepelnou a hmotnostní bilanci jednotky
5. Výpočtový projekt kondenzátoru
6. Analýzu chování při nižších výkonech

Parametry turbíny:

Výhřevnost plynu	36 600 kJ/m ³ n
Přebytek spalovacího vzduchu	1,96 -
Výkon hořáku	3 500 kW

Parametry turbíny:

Teplota před turbínou	800 °C
Tlak před turbínou	6,17 bar
Tlak za turbínou	1,129 bar

Seznam doporučené odborné literatury:

VILIMEC, L. *Parní kotle I.* Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2002. 116 s. ISBN: 80 - 248 - 0076 - 4
VILIMEC, L. *Parní kotle II.* Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1999. 150 s. ISBN: 80 - 7078 - 7.
Firemní podklady VÍTKOVICE POWER ENGINEERING.

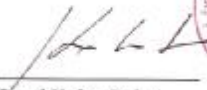
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**


Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010





prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svým rodičům, za to, že mi dali možnost studovat na vysoké škole a umožnili mi tak napsat tuto práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi a panu Ing. Milčákovi za trpělivost, ohleduplnost a čas, který mi věnovali, a tím umožnili dokončení této diplomové práce.

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2010


podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě:.....

21.5.2010

.....


Bc. Adam Gavala

Bc. Adam Gavala
Partyzánů 1938
688 01 Uherský Brod

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GAVALA, A. *Návrh separačního kondenzátoru pro demonstrační jednotku Flexibilního energetického systému*
Ostrava: katedra energetiky 361, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 50 s.
Diplomová práce, vedoucí: Vilimec, L.

Diplomová práce se zabývá popisem a návrhem separačního kondenzátoru pro demonstrační jednotku flexibilního energetického systému. Práce obsahuje tepelnou i hmotnostní bilanci celého systému se všemi nezbytnými výpočty, jako jsou výpočet vlastností parovzduchové směsi a vlastností spalín zemního plynu. V konstrukční části práce spočívá v návrhu tří různých druhů separátorů.

ANNOTATION OF THESIS

GAVALA, A. *Proposal of Separative Condenser for for Demonstration Union of Flexible Energy System*
Ostrava: Department of Power Supply 361, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2010, 50 pages.
Thesis, head: Vilimec, L.

Diploma thesis describes a proposal for a demonstration of the separation condenser unit flexible energy system. Work includes heat and mass balance of the entire system with all the necessary calculations such as calculating the properties steam-air mixture and combustion properties of natural gas. The components of the work lies in the design of three different types of separators.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

Seznam použitého označení

α	-	přebytek vzduchu
η	%	účinnost
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota
φ	%	relativní vlhkost
\varnothing	mm	průměr
c_v	-	součinitel klimatických podmínek
CH_4	%	metan
C_3H_8	%	propan-butan
C_mH_n	%	vyšší uhlovodíky
CO_2	%	oxid uhličitý
c_p	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita
d	mm	průměr
	$kg \cdot kg^{-1}$	měrná vlhkost vlhkého vzduchu
H_2O	%	vodní pára, voda
i	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie
m	$kg \cdot s^{-1}$	množství
N_2	%	dusík
O	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$	objem
P	MPa	tlak
Q	W	výkon
S	mm^2	plocha
t	$^{\circ}C$	teplota
V	$m^3 \cdot s^{-1}$	množství
w	-	suchost

Dolní indexy

CO_2	oxid uhličitý
H_2O	vodní pára, voda
ie	ideální
kon	kondenzátor

N	normální podmínky
N ₂	dusík
max	maximální
min	minimální
O ₂	kyslík
OV	ohřívač vody
S	spaliny
sk	skutečná
sp	sytá pára
SS	suché spaliny
V	vzduch
VS	vzduch suchý
VV	vzduch vlhký

Seznam zkratek

cp	cizí pára
D	dochlazovač
G	generátor
K	kompresor
NN	napájecí nádrž
NT	nízkotlaká část turbíny
ONV	ohřívač napájecí vody
OPVS	ohřívač parovzduchové směsi
pvs	parovzduchová směs
ReV	regenerativní výměník tepla
SeK	separační kondenzátor
SK	spalovací komora
Sp ₁	spaliny na vstupu do výměníku
Sp ₂	spaliny na výstupu z výměníku
VT	vysokotlaká část turbíny
VS1	první vstřík
VS2	druhý vstřík
ZP	zemní plyn

1. ÚVOD.....	1
2. FLEXIBILNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM (FES).....	2
2.1 ROZDĚLENÍ FES	2
2.2 POPIS FLEXIBILNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU.....	3
3. POTŘEBNÉ VÝPOČTY VLASTNOSTÍ SPALIN A PAROVZDUCHOVÉ SMĚSI	5
3.1 VLASTNOSTI ZEMNÍHO PLYNU A OSTATNÍ PARAMETRY PRO SPALOVÁNÍ BYLY ZADÁNY FIRMOU VÍTKOVICE A.S.....	5
3.2 VÝPOČET SPALIN PRO ZADANÝ PŘEBYTEK VZDUCHU	8
3.3 ENTALPIE SPALIN PŘI TEPLOTĚ 1200°C	10
3.4 PAROVZDUCHOVÁ SMĚS	11
3.5 VZOROVÝ VÝPOČET PAROVZDUCHOVÉ SMĚSI	11
4. SCHÉMA ZAPOJENÍ DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY A POPIS FUNKCE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ.....	16
4.1 POPIS FES.....	16
4.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ FES	17
5. TEPELNÁ A HMOTNOSTNÍ BILANCE DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY	18
5.1 BILANCE KOMPRESORU.....	19
5.2 BILANCE VSTŘIKU 1.....	21
5.3 BILANCE TURBÍNY	23
5.4 BILANCE VÝMĚNÍKU REV	25
5.5 BILANCE VSTŘIKU CIZÍ PÁRY	27
5.6 BILANCE VSTŘIKU 2.....	28
5.7 BILANCE OHŘÍVÁKU PAROVZDUCHOVÉ SMĚSI OPVS	30
5.8 BILANCE OHŘÍVÁKU NAPÁJECÍ VODY ONV	32
5.9 BILANCE DOCHLAZOVAČE	34
5.10 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ BILANCE	35
6. VÝPOČTOVÝ PROJEKT SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU	37
6.1 DRUHY MIKROCHLADIČŮ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.1.1 Mikrochladiče s uzavřeným systémem chlazení.....	Chyba! Záložka není definována.
6.1.2 Mikrochladiče s otevřeným systémem chlazení.....	Chyba! Záložka není definována.
6.2 NÁVRH SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.3 NÁVRH SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU CHLAZENÉHO VZDUCHEM.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.3.1 Výpočet vstupních parametrů	Chyba! Záložka není definována.
6.3.2 Separační kondenzátor s odloučením kondenzátu v jednotlivých trubkách.....	Chyba! Záložka není definována.
6.3.3 Separační kondenzátor s cyklonovými odlučovači...	Chyba! Záložka není definována.
6.4 NÁVRH SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU CHLAZENÉHO VODOU	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.4.1 Návrh Separačního kondenzátoru.....	Chyba! Záložka není definována.
7. OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU I PŘI NIŽŠÍM VÝKONU DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY	47
7.1 SEPARAČNÍ KONDENZÁTOR CHLAZENÝ VZDUCHEM.....	47
7.2 SEPARAČNÍ KONDENZÁTOR CHLAZENÝ VODOU	47
8. ZÁVĚR.....	48

9. SEZNAM PŘÍLOH.....	49
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50

1. ÚVOD

V dnešní době, kdy se klade důraz na energetickou náročnost, úspory a zvyšování účinnosti můžeme Flexibilní energetický systém (FES), zařadit do kategorie jedné z mnoha nových technologií, které se ve světě vyvíjejí. Demonstrační jednotku FES staví a vyvíjí firma VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.

FES pracuje na stejné funkci jako jiné kombinované energetické systémy. Spaluje palivo, vyrobí páru a ohřívá parovzduchovou směs pro plynovou turbínu, díky níž se produkuje elektřina a teplo.

Výjimečnost tohoto systému není ve spalování, ale ve speciálních vlastnostech pracovního média, kterým je parovzduchová směs (pvs). Pvs je směsí reálného vlhkého vzduchu stačeného kompresorem a páry, která se vstřikuje do stlačeného vzduchu a tím nám vzniká pvs se specifickými parametry jako pracovní médium pro plynovou turbínu.

2. FLEXIBILNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM (FES)

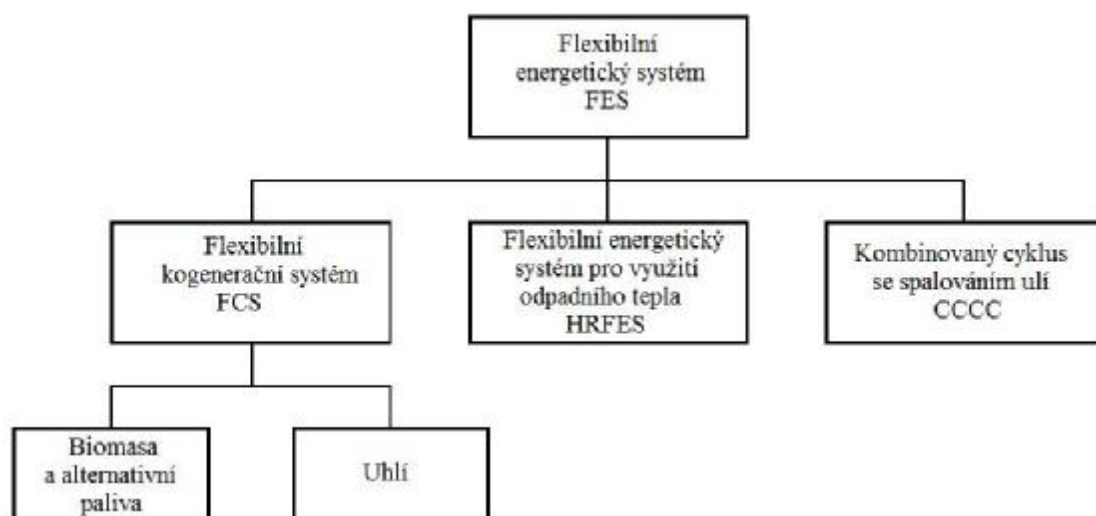
Zjednodušeně lze FES charakterizovat jako mokrý oběh s plynovou turbínou s nepřímým ohřevem pracovního média. Pracovním médiem je parovzduchová směs, která je směsí vzduchu a vodní páry.

FES je systém, který využívá Braytonův nebo kombinovaný Braytonův cyklus s Rankin-Clausiovým, pro transformaci primární energie v palivu na energii elektrickou s využitím běžné technologie spalování.

Jako primární energie pro FES jsou použita pevná paliva (např. uhlí, biomasa, alternativní paliva i odpady), ale lze i použít znečištěná kapalná a plynná paliva a odpady nevhodné pro přímé spalování v plynových motorech. Lze i využít teplo odpadních spalin z různých tepelných agregátů.

2.1 Rozdělení FES

Spalování uvedených paliv se uskutečňuje v ohništi s chlazenými stěnami, je použita ChSK (chlazená spalovací komora) provedená z membránových stěn zapojených jako výparník s přirozenou cirkulací (předaným teplem ve spalovací komoře se vyrábí sytá pára). Ohniště může být roštové GF, práškové PCF, s bublinkovou fluidní vrstvou BFB, s cirkulující fluidní vrstvou CFB, ale také pro spalování plynných a kapalných paliv G/OF. FES je využitelný u všech energetických systémů, možnosti jsou naznačeny na Obrázku 2-1.



Obr. 2-1 - Rozdělení FES [1]

- FCS - je flexibilní kogenerační systém (Flexible Cogeneration System) využívající uhlí, biomasu i alternativní paliva se zaměřením na jednotky nižších výkonů.
- HRFES - je energetický systém využívající teplo odpadních plynů (Heat Recovery Flexible Energy System), např. za různými tepelnými agregáty v hutích.
- CCCC - je kombinovaný paroplynový cyklus se spalováním uhlí (Coal Combustion Combi Cycle) pro elektrárenské bloky nejvyšších výkonů.

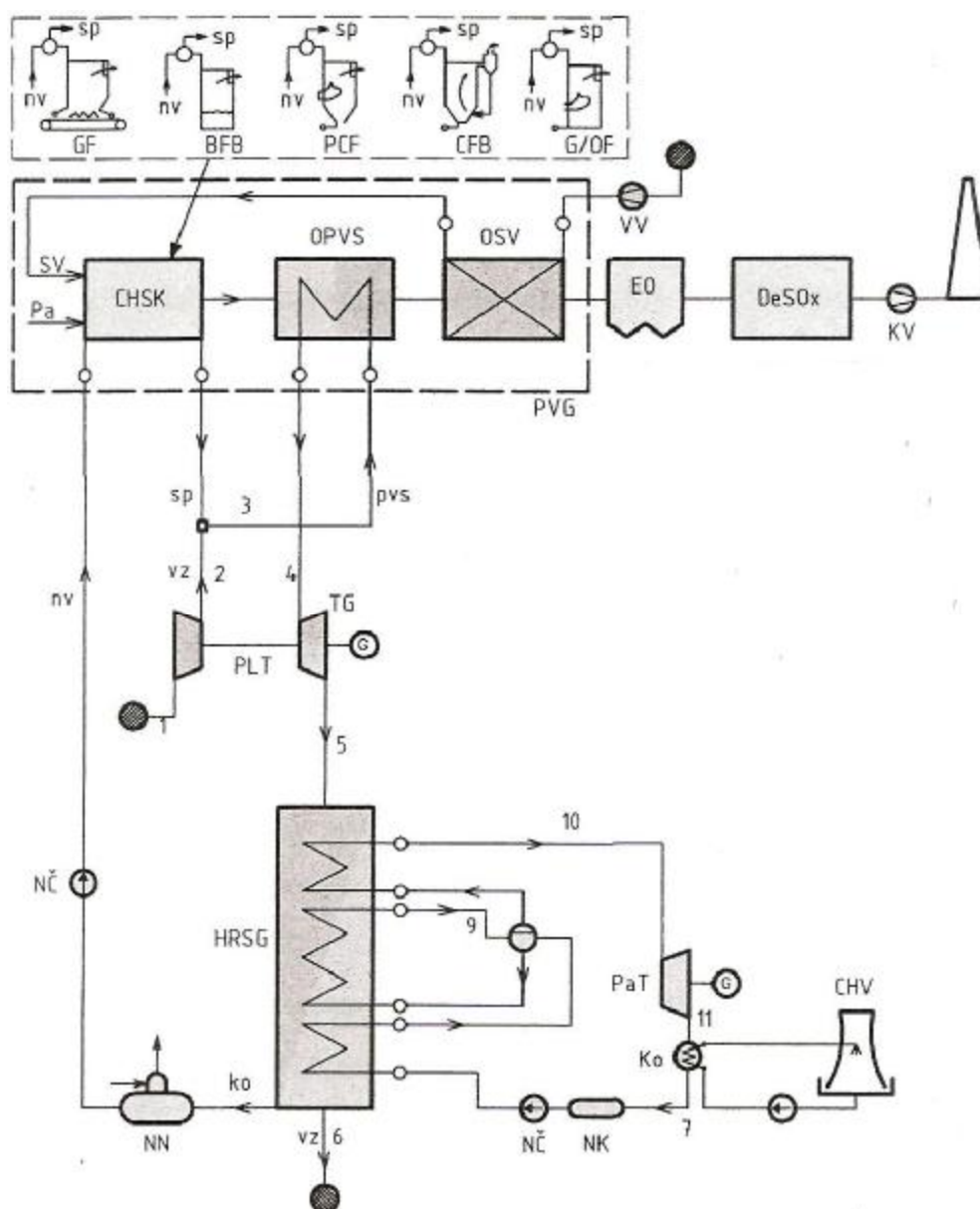
2.2 Popis Flexibilního energetického systému

Moje diplomová práce je zaměřená na flexibilní energetický systém v provedení s kogenerací (FCS) a také na kombinovaný paroplynový cyklus (CCCC.).

Na Obrázku 2-2 je vidět jak celý FES funguje. Vzduch 1 nasávaný kompresorem se stlačí na stav 2 a vstříkem se do stlačeného vzduchu přivede sytá pára z ChSK čímž vznikne parovzduchová směs pvs 3 s obsahem páry asi 12 až 20% tato se pak ohřívá spaliny vystupujícími z ChSK v ohříváku parovzduchové směsi OPVS na pracovní teplotu vstupního media do plynové turbíny PLT o teplotě 800°C.

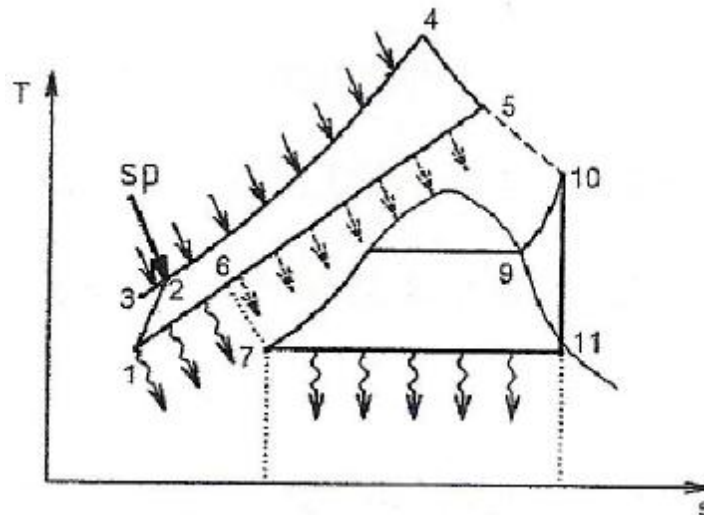
Po expanzi v turbíně parovzduchová směs 5 vstupuje do kotle na odpadní teplo HRGS, který je součástí Rankin-Clausiova oběhu. V kotli na odpadní teplo HRSG a v dalších výměnících se pvs ochladí na teplotu rosného bodu, vzduch se zbytkovou vlhkostí 6 se vypouští do okolí a odloučený kondenzát se vrací zpátky do chladicího okruhu ChSK.

Pro vychlazení spalin na výstupní teplotu do komína je za OPVS zařazen ohřívák spalovacího vzduchu OSV. Za OSV se spaliny zabavují TZL např. v elektrickém odlučovači a dále je zařazeno odsiřovací zařízení DeSOx pro splnění emisních limitů.



Obrázek 2-2 - Schéma FES [1]

Kombinovaný Braytonův cyklus s Rankin-Clausiovým, který je využit u mého FES je ilustrován na Obrázku 2-3 v T-s diagramu.



Obrázek 2-3 - T-s diagram [1]

Pro ověření základních parametrů a vlastností FES se ve firmě VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s. buduje demonstrační jednotka simulující jen vyvíjené části FES – tedy ChSk jako klasické zařízení je nahrazeno nechlazenou spalovací komorou na zemní plyn a není použit parní oběh za plynovou turbínou. Schéma demonstrační jednotky je popsáno v kapitole číslo 4.

[1]

3. POTŘEBNÉ VÝPOČTY VLASTNOSTÍ SPALIN A PAROVZDUCHOVÉ SMĚSI

3.1 Vlastnosti zemního plynu a ostatní parametry pro spalování byly zadány firmou VÍTKOVICE a.s.

Zadané hodnoty:

Složení Zemního plynu:

Metan $CH_4 = 97,7\%$

Propan-butan $C_3H_8 = 1,7\%$

Oxid uhličitý $CO_2 = 0,6\%$

Ostatní parametry pro demonstrační jednotku:

Přebytek vzduchu $a = 1,96$

Teplota spalin $t_{sp} = 1200^{\circ}C$

Výkon hořáku $Q_{hor} = 3500kW$

Výhřevnost Zemního plynu $Q_i^r = 36600kJ / kg$

Stechiometrický výpočet:

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 $[m_N^3]$ plynu:

$$O_{O_2, \min} = \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot O_{C_m H_n} \quad (3.1)$$

$$O_{O_2, \min} = \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{97,7}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{1,7}{100}$$

$$O_{O_2, \min} = \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{97,7}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{1,7}{100}$$

$$O_{O_2, \min} = 1,954 + 0,047$$

$$O_{O_2, \min} = 2,039 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 $[m_N^3]$ plynu:

$$O_{VS, \min} = \frac{O_{O_2, \min}}{0,21} \quad (3.2)$$

$$O_{VS, \min} = \frac{2,039}{0,21}$$

$$O_{VS, \min} = 9,71 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 $[m_N^3]$ plynu:

$$O_{VV, \min} = c_v \cdot O_{VS, \min} \quad (3.3)$$

$$O_{VV, \min} = 1,016 \cdot 9,71$$

$$O_{VV, \min} = 9,865 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

- $c_v = 1,016$ - běžné klimatické podmínky při konstrukčních výpočtech,
relativní vlhkost $j = 70[\%]$ a teplota $t = 20[^{\circ}C]$

Objem vodní páry v tomto objemu:

$$O_{H_2O}^V = O_{VV, \min} - O_{VS, \min} \quad (3.4)$$

$$O_{H_2O}^V = 9,865 - 9,71$$

$$O_{H_2O}^V = 0,155 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Nyní budou vypočítané dílčí objemy složek suchých spalín vzniklých při spalování plynu s přebytkem vzduchu $\alpha=1$.

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0,994 \cdot (o_{CO_2} + \sum o_{C_m H_n}) + 0,0003 \cdot O_{VS, \min} \quad (3.5)$$

$$O_{CO_2} = \frac{0,6}{100} + 0,994 \cdot \left(0 + \left(1 \cdot \frac{97,7}{100} \right) + \left(3 \cdot \frac{1,7}{100} \right) + 0 \right) + 0,0003 \cdot 9,71$$

$$O_{CO_2} = 0,006 + 0,994 \cdot (0,977 + 0,051) + 0,0029$$

$$O_{CO_2} = 1,031 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VS, \min} \quad (3.6)$$

$$O_{N_2} = 0 + 0,7805 \cdot 9,71$$

$$O_{N_2} = 7,579 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Výsledný objem suchých spalín je dán jejich součtem:

$$O_{SS, \min} = O_{CO_2} + O_{N_2} \quad (3.7)$$

$$O_{SS, \min} = 1,031 + 7,579$$

$$O_{SS, \min} = 8,61 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Objem vodní páry ve spalínách po stechiometrickém spálení plynu:

$$O_{H_2O}^S = \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_m H_n} + O_{H_2O}^V \quad (3.8)$$

$$O_{H_2O}^S = 2 \cdot 0,977 + 4 \cdot 0,017 + 0,155$$

$$O_{H_2O}^S = 2,177 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{O_{H_2O}^S}{O_{sp}} = \frac{2,177}{10,79} \cdot 100 = 20,176\%$$

Minimální objem vlhkých spalin je dán součtovým vztahem:

$$O_{VS,min} = O_{SS,min} + O_{H_2O}^S \quad (3.9)$$

$$O_{VS,min} = 8,61 + 2,177$$

$$O_{VS,min} = 10,79 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

[2]

3.2 Výpočet spalin pro zadaný přebytek vzduchu

Výpočet dílčích objemů složek suchých spalin vzniklých při spalování plynu pro zadaný přebytek vzduchu $\alpha=1,96$.

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2} = O_{CO_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,0003 \cdot O_{VS,min} \quad (3.10)$$

$$O_{CO_2} = 1,031 + (1,96 - 1) \cdot 0,0003 \cdot 9,71$$

$$O_{CO_2} = 1,0338 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Procentuelní zastoupení oxidu uhličitého ve spalinách:

$$O_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp}} \quad (3.11)$$

$$O_{CO_2} = \frac{1,0338}{27,538} \cdot 100 = 3,755\%$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2} = O_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,7805 \cdot O_{VS,min} \quad (3.12)$$

$$O_{N_2} = 7,759 + (1,96 - 1) \cdot 0,7805 \cdot 9,71$$

$$O_{N_2} = 14,854 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Procentuelní zastoupení dusíku ve spalínách:

$$O_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{sp}} \quad (3.13)$$

$$O_{N_2} = \frac{14,854}{27,538} \cdot 100 = 53,94\%$$

Objem vodní páry:

$$O_{H_2O}^S = O_{H_2O}^S + (a - 1) \cdot (c_v - 1) \cdot O_{VS, \min} \quad (3.14)$$

$$O_{H_2O}^S = 2,177 + (1,96 - 1) \cdot (1,016 - 1) \cdot 9,71$$

$$O_{H_2O}^S = 2,326 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Procentuelní zastoupení vodní páry ve spalínách:

$$O_{H_2O}^S = \frac{O_{H_2O}^S}{O_{sp}} \quad (3.15)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{2,326}{27,538} \cdot 100 = 8,447\%$$

Objem kyslíku ve spalínách:

$$O_{O_2, \min} = (a - 1) \cdot O_{VS, \min} \quad (3.16)$$

$$O_{O_2, \min} = (1,96 - 1) \cdot 9,71$$

$$O_{O_2, \min} = 9,321 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Procentuelní zastoupení kyslíku ve spalínách:

$$O_{O_2, \min} = \frac{O_{O_2, \min}}{O_{sp}} \quad (3.17)$$

$$O_{O_2, \min} = \frac{9,321}{27,538} \cdot 100 = 33,848\%$$

Výsledný objem suchých spalín:

$$O_{SS, \min} = O_{CO_2} + O_{N_2} \quad (3.18)$$

$$O_{SS, \min} = 1,0338 + 14,854$$

$$O_{SS,\min} = 15,89 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Minimální objem vlhkých spalín:

$$O_{VS,\min} = O_{SS,\min} + O_{H_2O}^S \quad (3.19)$$

$$O_{VS,\min} = 15,89 + 2,326$$

$$O_{VS,\min} = 18,216 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Skutečné množství spalín:

$$O_{sp} = O_{VS,\min} + (a - 1) \cdot O_{VS,\min} \quad (3.20)$$

$$O_{sp} = 18,216 + (1,96 - 1) \cdot 9,71$$

$$O_{sp} = 27,538 m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Množství paliva (zanedbávám chemický nedopal):

$$m_{pal} = \frac{Q_{hor}}{Q_i^r} \quad (3.21)$$

$$m_{pal} = \frac{3500}{36600}$$

$$m_{pal} = 0,0956 m_N^3 / s$$

Množství vzniklých spalín:

$$m_{sp} = m_{pl} \cdot O_{sp} \quad (3.22)$$

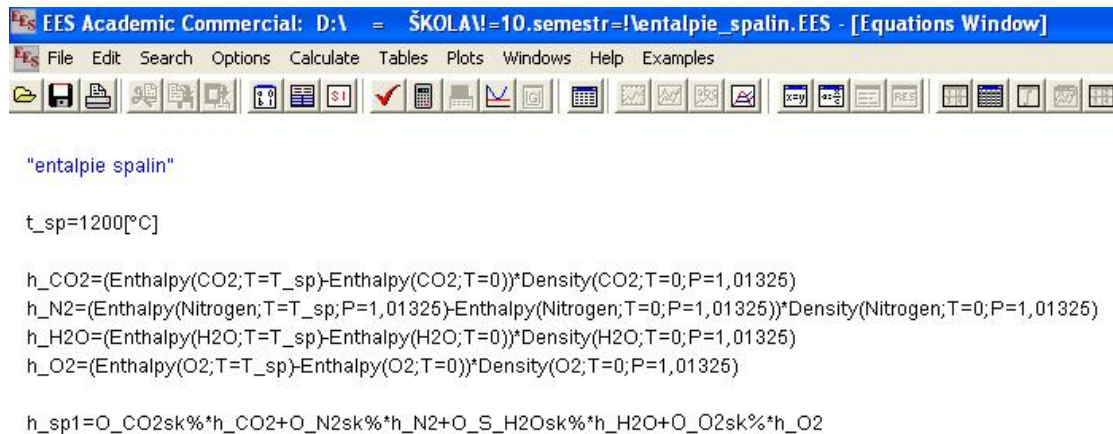
$$m_{sp} = 0,0956 \cdot 27,538$$

$$m_{sp} = 2,633 m_N^3 \cdot s$$

3.3 Entalpie spalín při teplotě 1200°C

Výpočet entalpie spalín jsem provedl podle konzultace ve firmě VÍTKOVICE a.s. Pro výpočet jsem využil program EES. Vzorový výpočet je na obrázku 3-1.

$$i_{sp1} = 1811 kJ / kg$$



Obrázek číslo 3-1 - Vzorový výpočet entalpie v programu EES

3.4 Parovzduchová směs

Je směsí reálného vlhkého vzduchu stlačeného kompresorem a procesní páry. Hned na začátku je potřeba definovat co je procesní pára a vodní pára.

Procesní páru lze definovat dvěma způsoby, vzniká nepřímým chlazením (chlazená spalovací komora) nebo přímým chlazením (vstřík vody do vzduchu popř. do pvs).

Vodní pára znamená souhrnné množství procesní páry a vlhkosti, která je obsažená ve vzduchu. Vodní pára v pvs může existovat v přehřátém stavu, jestliže teplota klesne na rosný bod (daný parciálním tlakem) ve stavu nasyceném. V nasyceném stavu odpovídá množství vodní páry v pvs parciálnímu tlaku vodní páry.

3.5 Vzorový výpočet parovzduchové směsi

Pro požadavky FES cyklu je nutné stanovit termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi. Parovzduchová směs je definovaná teplotou 500°C, celkovým tlakem 12bar a množstvím přiváděné procesní páry 20%.

Ve výpočtu se uvažuje s reálným vlhkým vzduchem nasávaným kompresorem o teplotě 15°C, barometrickém tlaku 0,98bar a relativní vlhkostí 60%.

Následující výpočty jsou pro ověření výpočtových vztahů, konkrétní výpočty jsou v kapitole 5.

Stanovení hmotnostních koncentrací suchého vzduchu a vodní páry

Měrná vlhkost vlhkého vzduchu

(teplotě 15[°C] odpovídá parciální tlak páry na mezi sytosti 0,01706[bar])

$$d = \frac{r_{sv}}{r_{vp}} \cdot \frac{\dot{J} \cdot p_{pp}''}{p_c - \dot{J} \cdot p_{pp}''} \quad (3.23)$$

$$d = \frac{287,1}{461,5} \cdot \frac{0,6 \cdot 0,01706}{0,98 - 0,6 \cdot 0,01706}$$

$$d = 0,006565 \text{ kg.kg}^{-1}$$

kde:

$r_{sv} =$	287,1	[kJ.kg ⁻¹ .K]	měrná plynová konstanta suchého vzduchu
$r_{vp} =$	461,5	[kJ.kg ⁻¹ .K]	měrná plynová konstanta vodní páry
$\varphi =$	0,6	[%]	relativní vlhkost vzduchu
$p_{pp}' =$	0,01706	[bar]	parciální tlak na mezi sytosti
$p_c =$	1	[bar]	barometrický tlak

Koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$w_{pd} = \frac{d}{1 + d} \quad (3.24)$$

$$w_{pd} = \frac{0,006565}{1 + 0,006565}$$

$$w_{pd} = 0,006522 \text{ kg.kg}^{-1}$$

kde:

$d =$	0,06565	[kg.kg ⁻¹]	měrná vlhkost vlhkého vzduchu
-------	---------	------------------------	-------------------------------

Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi

$$w_{vp} = (1 - w_{pp}) \cdot w_{pd} + w_{pp} \quad (3.25)$$

$$w_{vp} = (1 - 0,2) \cdot 0,006522 + 0,2$$

$$w_{vp} = 0,2052 \text{ kg.kg}^{-1}$$

kde

$w_{pd} =$	0,006522	[kg.kg]	koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu
$w_{pp} =$	0,2	[kg.kg]	koncentrace procesní páry pvs

Koncentrace suchého vzduchu v parovzduchové směsi

$$w_{sv} = 1 - w_{vp} \quad (3.26)$$

$$w_{sv} = 1 - 0,2052$$

$$w_{sv} = 0,7948 \text{ kg.kg}^{-1}$$

Stanovení parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry

Parciální tlak vodní páry p_{vp} v p_{vs} :

$$p_{vp} = p_c \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \quad (3.27)$$

$$p_{vp} = 12 \cdot \left[1 - \frac{0,7948 \cdot 287,1}{0,7948 \cdot 287,1 + 0,2052 \cdot 461,5} \right]$$

$$p_{vp} = 3,52 \text{ bar}$$

Parciální tlak suchého vzduchu

$$p_{sv} = p_c - p_{vp} \quad (3.28)$$

$$p_{sv} = 12 - 3,52$$

$$p_{sv} = 8,48 \text{ bar}$$

Entalpie parovzduchové směsi

Entalpie vodní páry při teplotě směsi a parciálním tlaku vodní páry je 3438 KJ.kg^{-1})

$$i_{sm} = w_{sv} \cdot i_{sv} + w_{vp} \cdot i_{vp} \quad (3.29)$$

$$i_{sm} = 0,7948 \cdot 522 + 0,2052 \cdot 3486$$

$$i_{sm} = 1130,34 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

kde

$$i_{sv} = 522 \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad \text{entalpie suchého vzduchu}$$

$$i_{pv} = 3486 \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad \text{entalpie vodní páry}$$

Entalpie suchého vzduchu

$$i_{sv} = c_{sv} / 0^{t_{sm}} \cdot t_{sm} \quad (3.30)$$

$$i_{sv} = 1,044 \cdot 500$$

$$i_{sv} = 522 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

kde

$$t_{sm} = 500 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{teplota parovzduchové směsí}$$

$$c_{sv} = 1,044 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{střední měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu}$$

Hustota parovzduchové směsi

Hustota pvs při celkovém tlaku a teplotě pvs:

$$r_{sm} = \frac{p_{sv}}{r_{sv} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} \quad (3.31)$$

$$r_{sm} = \frac{8,48 \cdot 10^5}{287,1 \cdot (273,15 + 500)} + \frac{3,52 \cdot 10^5}{461,5 \cdot (273,15 + 500)}$$

$$r_{sm} = 4,807 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

kde

$$T_{sm} = 773,15 \quad [\text{K}] \quad \text{teplota parovzduchové směsi}$$

Hustota parovzduchové směsi při normálních podmínkách:

$$r_{sm,N} = r_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_{sm}} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} \quad (3.32)$$

$$r_{sm,N} = 4,807 \cdot \frac{1,01325}{12} \cdot \frac{773,15}{273,15}$$

$$r_{sm,N} = 1,149 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Tepelná vodivost parovzduchové směsi

$$I_{sm} = \frac{y_{sv} \cdot I_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot I_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}}{y_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}} \quad (3.33)$$

$$I_{sm} = \frac{0,7067 \cdot 55,82 \cdot 10^{-3} \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 67,15 \cdot 10^{-3} \cdot 18,02^{1/3}}{0,7067 \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 18,02^{1/3}}$$

$$I_{sm} = 58,783 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$$y_{sv} = 0,7067 \quad [\text{kmol.kmol}^{-1}] \quad \text{molární koncentrace suchého vzduchu v pvs}$$

$$\lambda_{sv} = 55,82 \cdot 10^{-3} \quad [\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad \text{tepelná vodivost suchého vzduchu}$$

$$M_{sv} = 28,96 \quad [\text{kg.kmol}^{-1}] \quad \text{molární hmotnost suchého vzduchu}$$

$$y_{vp} = 0,2933 \quad [\text{kmol.kmol}^{-1}] \quad \text{molární koncentrace vodní páry v pvs}$$

$$\lambda_{vp} = 67,15 \cdot 10^{-3} \quad [\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad \text{tepelná vodivost vodní páry}$$

$$M_{vp} = 18,02 \quad [\text{kg.kmol}^{-1}] \quad \text{molární hmotnost vodní páry}$$

Viskozita parovzduchové směsiDynamická viskozita **pvs**

$$h_{sm} = \frac{h_{vp}}{1 + \Phi_{pv} \cdot \frac{y_{sv}}{y_{vp}}} + \frac{h_{sv}}{1 + \Phi_{sv} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{sv}}} \quad (3.34)$$

$$h_{sm} = \frac{28,58}{1 + 1,115 \cdot \frac{0,7067}{0,2933}} + \frac{35,92}{1 + 0,8721 \cdot \frac{0,2933}{0,7067}}$$

$$h_{sm} = 34,128 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

kde:

$$\Phi_{pv} = 1,115 \quad [] \quad \text{jkjg}$$

$$\Phi_{sv} = 0,8721 \quad [] \quad \text{jkjg}$$

$$\Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{h_{vp}}{h_{sv}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} + \left(1 + \frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{1/2}} \quad (3.35)$$

$$\Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{28,58}{35,92} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,96}{18,02} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} + \left(1 + \frac{18,02}{28,96} \right)^{1/2}}$$

$$\Phi_{pv} = 1,115$$

$$\Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{h_{sv}}{h_{vp}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} + \left(1 + \frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{1/2}} \quad (3.36)$$

$$\Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{35,92}{28,58} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{18,02}{28,96} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} + \left(1 + \frac{28,96}{18,02} \right)^{1/2}}$$

$$\Phi_{vp} = 0,8721$$

Kinematická viskozita pvs

$$n_{sm} = \frac{h_{sm}}{r_{sm}} \quad (3.37)$$

$$n_{sm} = \frac{34,128 \cdot 10^{-6}}{4,807}$$

$$n_{sm} = 7,099 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

[3]

4. SCHÉMA ZAPOJENÍ DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY A POPIS FUNKCE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ

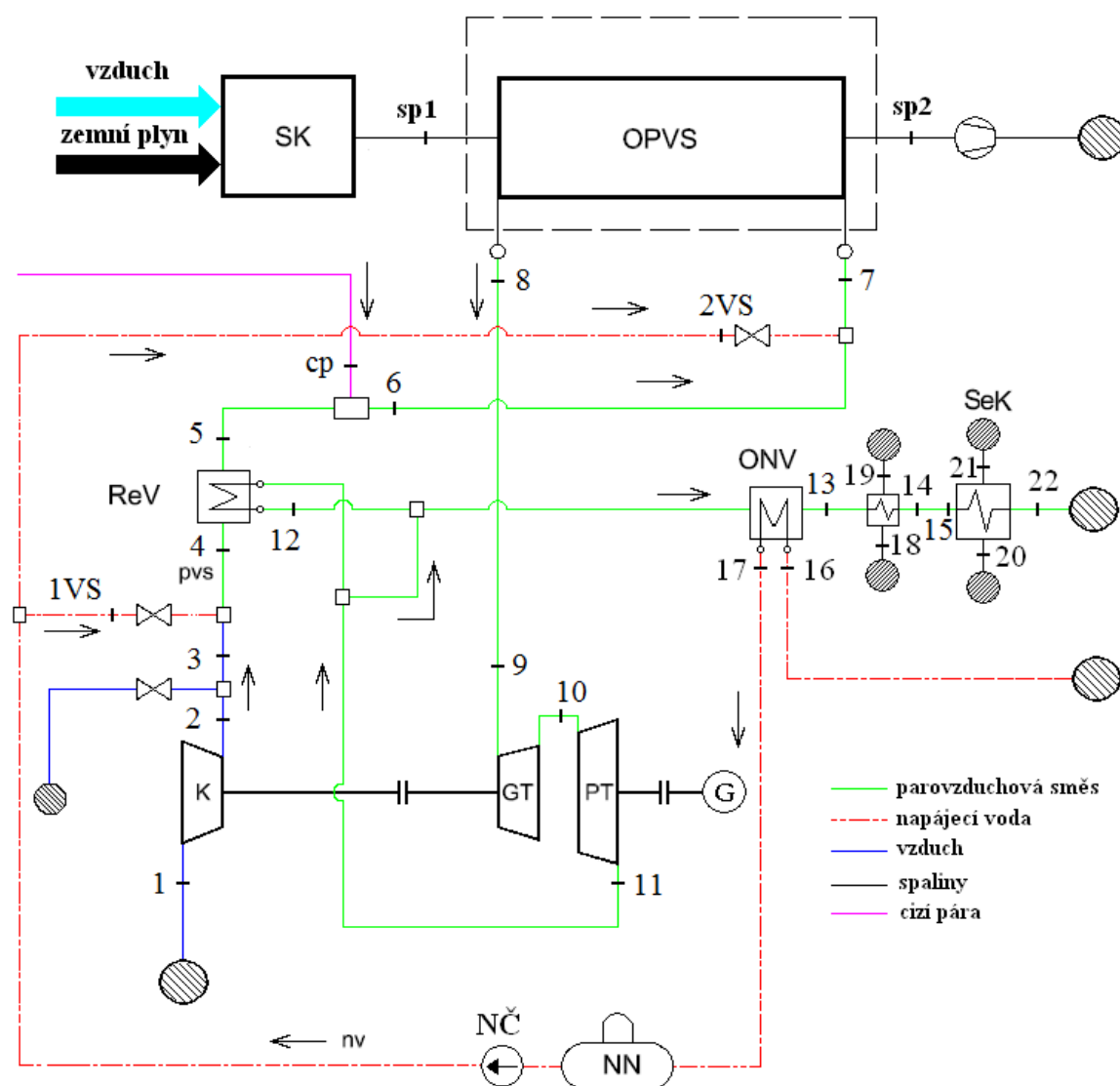
4.1 Popis FES

Demonstrační jednotky FES Obrázku 4-1 je sled energetických zařízení zapojených do jednoho energetického systému tak, aby vyráběl elektřinu a teplo.

Funkce FES spočívá v nasátí vzduchu 1 a jeho stlačení v kompresoru 2 po kterém následuje odفuk 3 části stlačeného vzduchu. Za odفukem je umístěn první vstřik napájecí vody 1VS, do stlačeného vzduchu se vstříkne napájecí voda, která se odpaří a vznikne parovzduchová směs. Dále pokračuje pvs do ReV 5, aby se zvýšila její teplota před 6 vstřikem cizí páry.

Za přívodem cizí páry 6 se nachází poslední vstřik VS2, který má za úkol snížit teplotu pvs před vstupem do OPVS 7. V OPVS dochází k ohřátí parovzduchové směsi spaliny, které vzniknou spálením zemního plynu ve SK.

Parovzduchová směs má nyní nejvyšší entalpii 8 a potrubím proudí do turbíny 9, V turbíně odevzdá část své energie, díky které generátor vyprodukuje elektřinu. Parovzduchová směs, která vystupuje z turbíny 11, proudí dále do ReV kde ohřeje parovzduchovou směs o nižší teplotě vystupujícího ze vstřikovaného chladiče 1VS, za ReV následuje ONV, zde předá parovzduchová směs 12 svojí energii napájecí vodě a proudí dále do dochlazovače. V dochlazovači D dochází ke snížení teploty parovzduchové směsi 13 na teplotu 14 saturace. Posledním energetickým zařízením v systému, je SeK v němž parovzduchová směs 15 se ochladí na teplotu 22, část vodní páry zkondenzuje a vlhký vzduch 22 se odvádí do atmosféry.



Obrázek 4-1 - Schéma FES

4.2 Popis jednotlivých částí FES

K	Kompresor	Dochází ke stlačování nasávaného vzduchu
ReV	Regenerativní výměník	Výměník tepla, kde je pvs ohřívána emisní pvs z turbíny
ONV	Ohřívák napájecí vody	Výměník tepla, ve kterém ohřívá pvs napájecí vodu
SeK	Separací kondenzátor	Slouží ke zkondenzování pvs a odloučení kondenzátu
NN	Napájecí nádrž	Zásoba napájecí vody pro potřebné vstřiky
VT, NT	Turbína	Modifikovaná letecká turbína WALTER, která se skládá z vysokotlaké a nízkotlaké části
G	Generátor	Transformuje mechanickou energii na energii elektrickou

NČ	Napájecí čerpadlo	Dopravuje vodu pro vstříky 1. a 2.
SK	Spalovací komora	Spalováním ZP vznikají spaliny, které následně vstupují do OPVS
OPVS	Ohřívač parovzduchové směsi	Výměník tepla kde spaliny předávají část své energie k ohřátí pvs
1,2 VS	Vstříky	Vstříky napájecí vody, při kterých mění pvs své parametry
cp	cizí pára	Přívod cizí páry
D	Dochlazovač	Slouží k dochlazení pvs před vstupem do SeK

5. TEPELNÁ A HMOTNOSTNÍ BILANCE DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY

V této kapitole je tepelná a hmotnostní bilance celého FES, který byl navržen ve firmě VÍTKOVICE a.s., výchozí parametry pro výpočet FES byly zadány po konzultacích. Zbylé parametry budou ze zadaných hodnot bilančně vypočteny následovně.

Pro výpočet FES jsem použil program EES, který jsem využil k výpočtu entalpií parovzduchové směsi a ostatních parametrů FES. Pro výpočet entalpie pvs mi byla poskytnuta funkce v programu EES. Pro zjednodušení výpočtu neuvažuji se ztrátami.

Zadané parametry:

Výhřevnost plynu	36 600 [kJ/m ³ n]
Přebytek spalovacího vzduchu	1,96 [-]
Výkon hořáku	3 500 [kW]
Teplota před turbínou	800[°C]
Tlak před turbínou	6,17[bar]
Tlak za turbínou	1,129[bar]

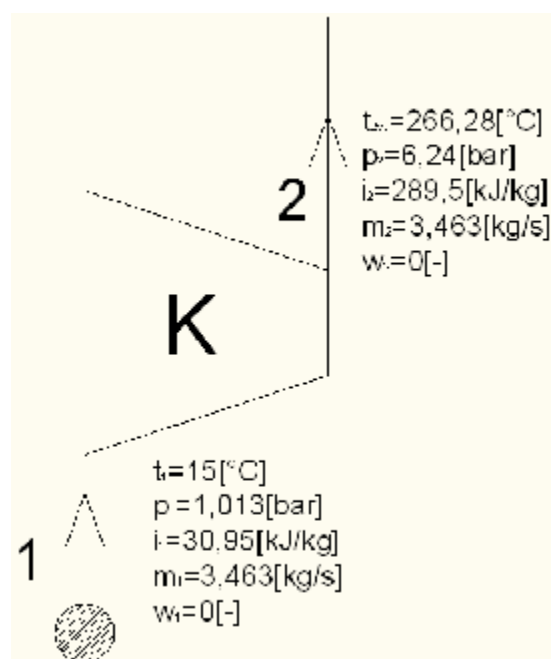
Zadané parametry po konzultaci ve firmě VÍTKOVICE a.s.:

Teplota vzduchu před kompresorem	15 [°C]
Tlak vzduchu před kompresorem	1,013 [bar]
Množství vzduchu před kompresorem	3,463 [kg/s]
Tlak za kompresorem	6,24 [bar]
Množství odvodu za kompresorem	1,15 [kg/s]
Teplota napájecí vody	105 [°C]

Tlak napájecí vody	6,24 [bar]
Množství napájecí vody pro první vstřík	0,1716 [kg/s]
Teplota pvs za ReV	434 [°C]
Tlak cizí páry	6,241[bar]
Množství cizí páry	0,46[kg/s]
Množství napájecí vody pro druhý vstřík	0,17[kg/s]
Teplota spalin na vstupu do OPVS	1200[°C]
Teplota ohřívání pvs za OPVS	835[°C]
Množství vody pro napájecí nádrž	0,4617[kg/s]

5.1 Bilance kompresoru

Kompresor nasává množství vzduchu $m_1=3,467$ kg/s ten je kompresorem stlačen a ohřát. Na obrázku 5-1 jsou parametry vzduchu, před a za kompresorem po obrázku následuje bilanční výpočet.



Obrázek 5-1 - Bilance kompresoru

Vstupní teplota

$$t_1 = 15^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = 15 + 273,15$$

$$T_1 = 288,15\text{K}$$

kde:

$T_1 = 288,15$ [K] teplota nasávaného vzduchu

Výpočet ideální teploty za kompresorem

$$\frac{T_{2ie}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{2ie} \quad (5.1)$$

$$T_{2ie} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_1$$

$$T_{2ie} = \left(\frac{6,24}{1,013} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \cdot 288,15$$

$$T_{2ie} = 484,4K \Rightarrow t_{2ie} = 211,25^\circ C$$

kde:

$T_{2ie} = 484,4$ [K] ideální teplota stlačeného vzduchu

$p_1 = 1,013$ [bar] tlak před kompresorem

$p_2 = 6,24$ [bar] tlak za kompresorem

$\kappa = 1,4$ [-] adiabatický exponent vzduchu

Skutečná kompresní teplota

$$h_K = \frac{T_{2ie} - T_1}{T_{2sk} - T_1} \Rightarrow T_{2sk} \quad (5.2)$$

$$T_{2sk} = T_1 + \frac{T_{2ie} - T_1}{h_K}$$

$$T_{2sk} = 288,15 + \frac{484,15 - 288,15}{0,78}$$

$$T_{2sk} = 539,43K \Rightarrow t_{2sk} = 266,28^\circ C$$

kde:

$T_{2sk} = 539,43$ [K] skutečná teplota stlačeného vzduchu

$\eta_k = 0,78$ [-] účinnost kompresoru

Entalpie vzduchu za kompresorem

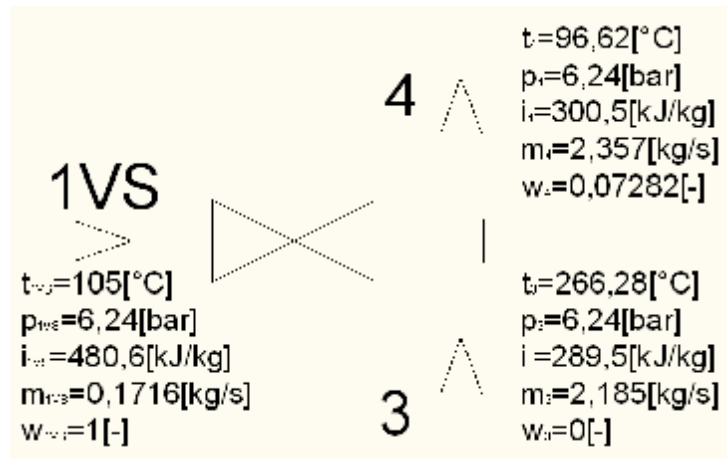
Entalpie vzduchu za a před kompresorem je vypočítána v programu EES pomocí teplot t_1, t_{2sk} , tlaků p_1, p_2 a suchostí w_1, w_2 .

$$t_1 = 15[^\circ C], p_1 = 1,013[\text{bar}], w_1 = 0[-] \Rightarrow i_1 = 30,95[\text{kJ/kg}]$$

$$t_{2sk}=266,28[^\circ\text{C}], p_2=6,24[\text{bar}], w_2=0[-] \Rightarrow i_2=289,5[\text{kJ/kg}]$$

5.2 Bilance vstříku 1.

Vstřík spočívá ve vstříknutí napájecí vody do stlačeného vzduchu kompresorem čímž nám vznikne parovzduchová směs. Na obrázku 5-2 je vše naznačeno graficky. Poté následuje bilanční výpočet.



Obr. 5-2 - Bilance prvního vstříku

Hmotnostní bilance

$$m_4 = m_3 + m_{vs1} \quad (5.3)$$

$$m_4 = 2,185 + 0,1716$$

$$m_4 = 2,357 \text{ kg/s}$$

kde:

$m_3 = 2,185$ [kg/s] množství stlačeného vzduchu za kompresorem

$m_{vs1} = 0,1716$ [kg/s] množství napájecí vody pro 1 vstřík

$m_4 = 2,357$ [kg/s] množství pvs za vstříkem 1

Výpočet entalpie média na vstříku 1

Entalpie vstříkované vody je vypočítána pomocí teploty t_{vs1} a tlaku p_{vs1} , výpočet jsme provedli v programu EES.

$$t_{vs1} = 105[^\circ\text{C}], p_{vs1} = 6,24[\text{bar}] \Rightarrow i_{vs1} = 440,6[\text{kJ/kg}]$$

kde:

$t_{vs1} = 105$ [°C] teplota napájecí vody pro vstřík 1

$p_{vs1} = 6,24$ [bar] tlak napájecí vody pro vstřík 1

Z bilance vstříku 1 je vypočtena entalpie parovzduchové směsi i_4 za vstříkem napájecí vody.

$$m_3 \cdot i_3 + m_{vs1} \cdot i_{vs1} = m_4 \cdot i_4 \Rightarrow i_4 \quad (5.4)$$

$$i_4 = \frac{m_3 \cdot i_3 + m_{vs1} \cdot i_{vs1}}{m_4}$$

$$i_4 = \frac{2,185 \cdot 289,5 + 0,1716 \cdot 440,6}{2,357}$$

$$i_4 = 300,5 \text{ kJ/kg}$$

kde:

$i_{vs1} = 2686$ [kJ/kg] entalpie vstříku 1

$i_3 = 289,5$ [kJ/kg] entalpie před vstříkem

$m_4 = 2,357$ [kg/s] množství pvs po vstříku 1

Výpočet teploty za vstříkem 1

Entalpie pvs za vstříkem je funkcí poměru hmotnosti vzduchu k poměru vstříkované vody w_4 , teploty t_4 a tlaku p_4 . Proto bude vypočítán parametr w_4 .

$$w_4 = \frac{m_{vs1}}{m_4} \quad (5.5)$$

$$w_4 = \frac{0,1716}{2,357}$$

$$w_4 = 0,07282$$

kde:

$m_4 = 2,357$ [kg/s] množství pvs po vstříku 1

$m_{vs1} = 0,1716$ [kg/s] množství napájecí vody pro vstřík 1

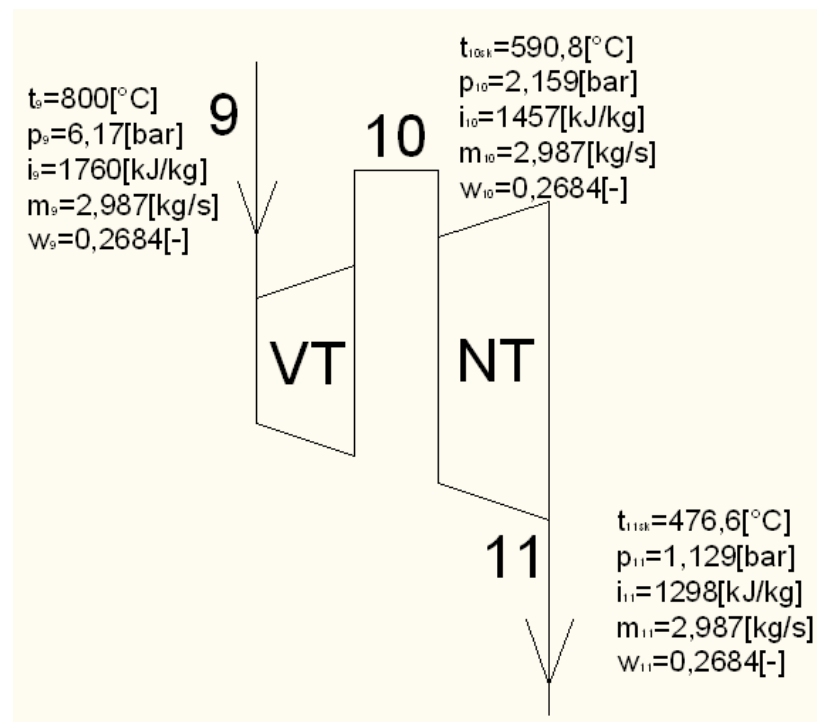
$w_4 = 0,07282$ [-] poměr páry v parovzduchové směsi

Jestliže znám entalpii vstříku, tlak a poměr w_4 , tak lze pomocí programu ESS vypočítat teplotu vstříku.

$$i_4 = 300,5 \text{ [kJ/kg]}, p_4 = 6,24 \text{ [bar]}, w_4 = 0,07282 \text{ [-]} \Rightarrow t_4 = 96,62 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

5.3 Bilance turbíny

Nyní musí být bilančně vypočítána turbína. Parametry na vstupu do turbíny jsou zadány dle firmy pro modifikovanou leteckou turbínu WALTER. Bilance turbíny se provádí nyní, aby mohli být vypočítány výstupní parametry, které se rovnají vstupním parametrům pro výměník ReV. Schematicky je bilance naznačena na obrázku 5-3.



Obr. 5-3 - Bilance Turbíny

Ideální teplota t_{10ie} prvního stupně turbíny

$$\frac{T_{10ie}}{T_9} = \left(\frac{p_9}{p_{10}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{10ie} \quad (5.6)$$

$$T_{10ie} = \left(\frac{p_9}{p_{10}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_9$$

$$T_{10ie} = \left(\frac{6,17}{2,159} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} \cdot 1073,15$$

$$T_{10ie} = 827\text{K} \Rightarrow t_{10ie} = 554^\circ\text{C}$$

kde:

$t_{10ie} = 554$ $[\text{}^\circ\text{C}]$ ideální teplota za 1. stupněm turbíny

$T_9 = 1073,15$ $[\text{K}]$ teplota před turbínou

$p_9 =$	6,17	[bar]	tlak před turbínou
$p_{10} =$	107,15	[bar]	tlak za prvním stupněm turbíny
$\kappa =$	1,33	[-]	adiabatický exponent pvs

Skutečná teplota t_{10sk}

$$h_{T1} = \frac{T_9 - T_{10sk}}{T_9 - T_{10ie}} \Rightarrow T_{10sk} \quad (5.7)$$

$$T_{10sk} = T_9 - h_{T1} \cdot (T_9 - T_{10ie})$$

$$T_{10sk} = 1073,15 - 0,85 \cdot (1073,15 - 827)$$

$$T_{10sk} = 863,9K \Rightarrow t_{10sk} = 591^\circ C$$

kde:

$$t_{10sk} = 591 \quad [^\circ C] \quad \text{skutečná teplota za 1 stupněm turbínou}$$

$$\eta_{T1} = 0,85 \quad [-] \quad \text{účinnost vysokotlaké turbíny}$$

Ideální teplota t_{10ie} druhého stupně turbíny

$$\frac{T_{11ie}}{T_{10sk}} = \left(\frac{p_{10}}{p_{11}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{11ie} \quad (5.8)$$

$$T_{11ie} = \left(\frac{p_{10}}{p_{11}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_{10sk}$$

$$T_{11ie} = \left(\frac{2,159}{1,129} \right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot 863,9$$

$$T_{11ie} = 735,6K \Rightarrow t_{11ie} = 462,6^\circ C$$

kde:

$$t_{11ie} = 431,65 \quad [^\circ C] \quad \text{ideální teplota za turbínou}$$

$$p_{11} = 1,129 \quad [\text{bar}] \quad \text{tlak za turbínou}$$

Skutečná teplota t_{10sk}

$$h_{T2} = \frac{T_{10sk} - T_{11sk}}{T_{10sk} - T_{11ie}} \Rightarrow T_{11sk} \quad (5.9)$$

$$T_{11sk} = T_{10sk} - h_{T2} \cdot (T_{10sk} - T_{11ie})$$

$$T_{11sk} = 863,9 - 0,89 \cdot (863,9 - 735,6)$$

$$T_{11sk} = 749,7K \Rightarrow t_{11sk} = 476,6^\circ C$$

kde:

$t_{11sk} = 476,6$ [°C] skutečná teplota za turbínou

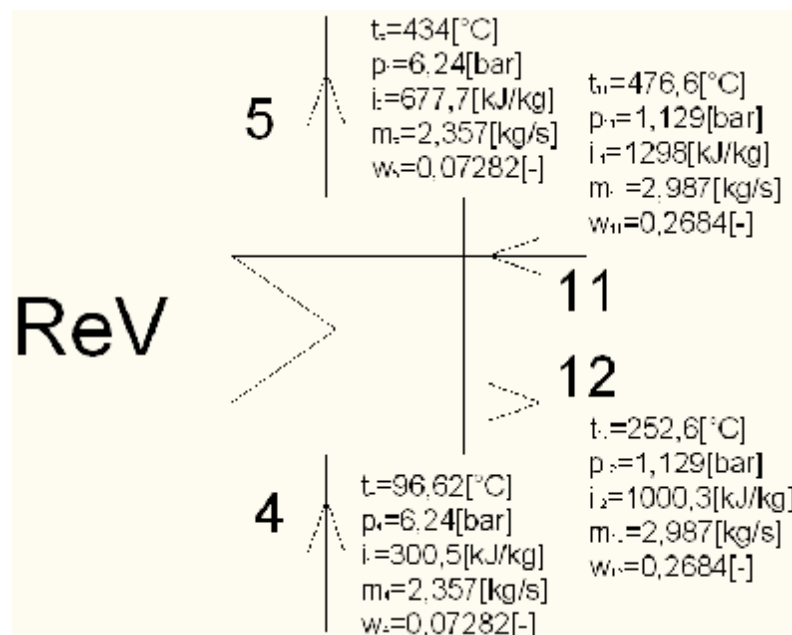
$\eta_{T2} = 0,89$ [-] účinnost nízkotlaké turbíny

Nyní bude vypočítána entalpie parovzduchové směsi za turbínou ze skutečné teploty t_{11sk} , tlaku p_{11} a poměru w_{11} opět z programu EES.

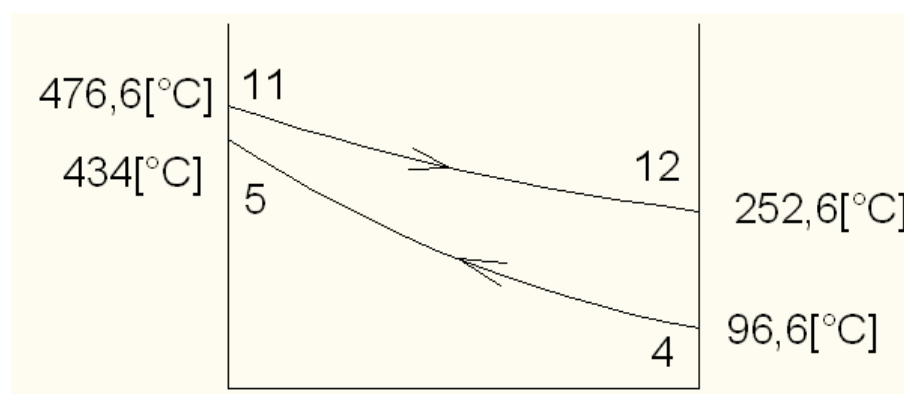
$t_1 = 476,6$ [°C], $p_{11} = 1,129$ [bar], $w_{11} = 0,2684$ [-] $\Rightarrow i_{11} = 1298$ [kJ/kg]

5.4 Bilance výměníku ReV

Bilance turbíny byla již provedena v přecházející kapitole, a proto může být nyní provedena bilance výměníku ReV. Kompletní bilance je na obrázku 5-4 a na obrázku 5-5 můžeme vidět teplotní spády ve výměníku.



Obr. 5-4 - Bilance výměníku ReV



Obr. 5-5 - Teplotní spád výměníku

kde:

$t_4 =$	96,92	[°C]	teplota před výměníkem
$t_5 =$	434	[°C]	teplota za výměníkem
$p_4 =$	6,24	[bar]	tlak pvs před výměníkem
$p_5 = p_4$		[bar]	tlak pvs za výměníkem
$w_4 =$	0,07282	[-]	poměr páry v parovzduchové směsi
$w_5 = w_4$		[-]	poměr páry v parovzduchové směsi

Nyní může být z výše uvedených parametrů pomocí programu EES spočítána entalpie za výměníkem.

$$t_5 = 434^\circ\text{C} \quad p_5 = 6,25\text{bar}, w_5 = 0,07282 \quad \Rightarrow \quad i_5 = 677,7\text{kJ/kg}$$

navrženo:

$t_5 =$	434	[°C]	teplota pvs za výměníkem
$p_{11} =$	1,129	[bar]	tlak po expanzi za turbínou

Hmotnostní bilance ReV

V následující hmotnostní bilanci bude vypočítána entalpie i_{12} za výměníkem a s ní bude pomocí programu EES dopočítána teplota t_{12} .

$$m_{11} \cdot (i_{11} - i_{12}) = m_4 \cdot (i_5 - i_4) \Rightarrow i_{12} \quad (5.10)$$

$$i_{12} = i_{11} - \frac{m_4 \cdot (i_5 - i_4)}{m_{10}}$$

$$i_{12} = 1298 - \frac{2,357 \cdot (677,7 - 300,5)}{2,986}$$

$$i_{12} = 1000,3\text{kJ/kg}$$

kde:

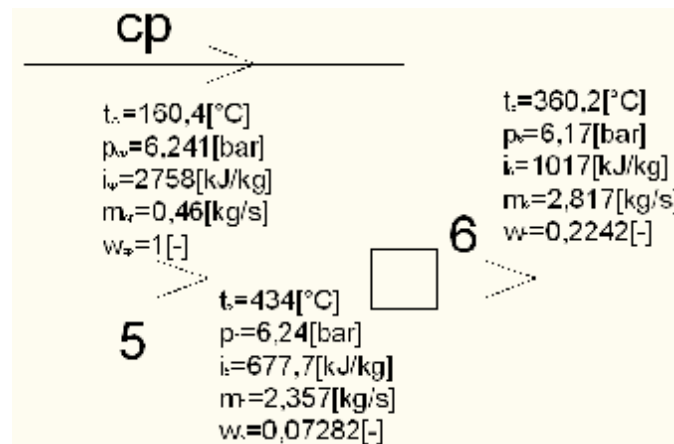
$i_{11} =$	1391	[kJ/kg]	entalpie za turbínou
$i_4 =$	300,5	[kJ/kg]	entalpie za vstřikem 1.
$i_5 =$	677,7	[kJ/kg]	entalpie za ReV
$m_4 =$	2,357	[kg/s]	množství pvs za vstřikem 1.
$m_{11} =$	2,986	[kg/s]	množství pvs před ReV

Nyní může být z výše uvedených parametrů pomocí programu EES spočítána teplota parovzduchové směsi za výměníkem ReV.

$$i_{12}=1000,3[\text{kJ/kg}], p_{12}=1,129[\text{bar}], w_{12}=0,2967[-] \Rightarrow t_{12}=252,6[^\circ\text{C}]$$

5.5 Bilance vstřiku cizí páry

Po ohřátí pvs v ReV následuje další vstřik cizí páry. Cizí pára je na mezi sytosti. Schéma vstřiku cizí páry je na obrázku 5-6.



Obr. 5-6 - Bilance vstřiku cizí páry

Výpočet teploty cizí páry jsem vypočítal v programu EES

$$p_{cp}=6,241[\text{bar}], w=1[-] \Rightarrow t_{cp}=160,4[^\circ\text{C}]$$

Entalpii cizí páry jsme vypočítal pomocí tlaku p_{cp} , poměru w_{cp} a teploty t_{cp} v programu ESS.

$$t_{cp}=160,4[^\circ\text{C}], p_{cp}=6,241[\text{bar}], w_{cp}=1[-] \Rightarrow i_{cp}=2758\text{kJ/kg}$$

Hmotnostní bilance

$$m_6 = m_5 + m_{cp} \quad (5.11)$$

$$m_6 = 2,357 + 0,46$$

$$m_6 = 2,817\text{kg/s}$$

kde:

$$m_5 = 2,357 \quad [\text{kg/s}] \quad \text{množství pvs před vstřikem cizí páry}$$

$$m_7 = 2,817 \quad [\text{kg/s}] \quad \text{množství pvs po vstřiku cizí páry}$$

$$m_{cp} = 0,46 \quad [\text{kg/s}] \quad \text{množství syté páry}$$

Z bilance vstřiku cizí páry je vypočtena entalpie pvs i_6 za vstřikem cizí páry

$$m_5 \cdot i_5 + m_{cp} \cdot i_{cp} = m_6 \cdot i_6 \Rightarrow i_6 \quad (5.12)$$

$$i_6 = \frac{m_5 \cdot i_5 + m_{cp} \cdot i_{cp}}{m_6}$$

$$i_6 = \frac{2,357 \cdot 677,7 + 0,46 \cdot 2758}{2,816}$$

$$i_6 = 1017 \text{ kJ/kg}$$

kde:

$i_{cp} = 2758$ [kJ/kg] entalpie vstřikované cizí páry

$i_5 = 677,7$ [kJ/kg] entalpie před vstřikem

$i_6 = 1017$ [kJ/kg] entalpie za vstřikem

Výpočet teploty za vstřikem cizí páry

Entalpie pvs za vstřikem je funkcí teploty t_6 , tlaku p_6 a poměru hmotnosti vzduchu k poměru vstřikované vody w_6 .

$$w_6 = \frac{m_{vs1} + m_{cp}}{m_6} \quad (5.13)$$

$$w_6 = \frac{0,1716 + 0,46}{2,817}$$

$$w_6 = 0,2242$$

kde:

$m_6 = 2,816$ [kg/s] množství pvs po vstřiku cizí páry

$m_{vs1} = 0,1716$ [kg/s] množství napájecí vody pro vstřik 1

$m_{cp} = 0,46$ [kg/s] množství syté páry pro vstřik

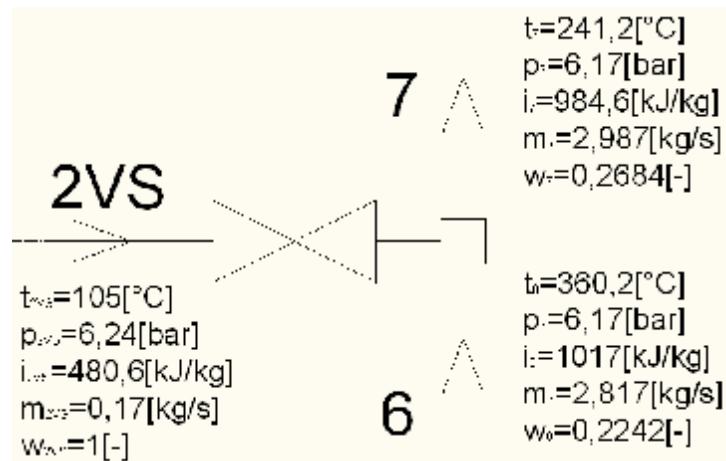
$w_6 = 0,2242$ [-] poměr páry v parovzduchové směsi

Pokud je tedy známa entalpie, tlak a poměr w_6 , tak lze pomocí programu ESS určit teplotu.

$$i_6 = 1017 \text{ [kJ/kg]}, p_6 = 6,17 \text{ [bar]}, w_6 = 0,2242 \text{ [-]} \Rightarrow t_6 = 360,2^\circ\text{C}$$

5.6 Bilance vstřiku 2.

Poslední vstřik napájecí vody se nachází před OPVS, bilance je na obrázek 5-7



Obrázek 5-7 - Balance druhého vstřiku napájecí vody

Hmotnostní balance

$$m_7 = m_6 + m_{vs2} \quad (5.14)$$

$$m_7 = 2,817 + 0,17$$

$$m_7 = 2,987 \text{ kg/s}$$

kde:

$m_6 = 2,817$ [kg/s] množství parovzduchové směsi před vstřikem 2

$m_6 = 2,987$ [kg/s] množství parovzduchové směsi za vstřikem 2

$m_{vs2} = 0,17$ [kg/s] množství napájecí vody pro vstřik 2

Výpočet entalpie vstřiku 2

Entalpie vstřikované napájecí vody je vypočítána pomocí teploty t_{vs2} , tlaku p_{vs2} a poměru w_{vs2} výpočet jsem provedl v programu EES.

$$t_{vs2} = 105[^\circ\text{C}], p_{vs2} = 6,24[\text{bar}], w_{vs2} = 0[-] \Rightarrow i_{vs2} = 440,6 \text{ kJ/kg}$$

Z balance vstřiku 2 je vypočtena entalpie i_7 za vstřikem napájecí vody

$$m_6 \cdot i_6 + m_{vs2} \cdot i_{vs2} = m_7 \cdot i_7 \Rightarrow i_7 \quad (5.15)$$

$$i_7 = \frac{m_6 \cdot i_6 + m_{vs2} \cdot i_{vs2}}{m_7}$$

$$i_7 = \frac{2,817 \cdot 1017 + 0,17 \cdot 2686}{2,987}$$

$$i_7 = 984,6 \text{ kJ/kg}$$

kde:

$i_{vs2} =$	440,6	[kJ/kg]	entalpie vstřikované vody 2.
$i_6 =$	1017	[kJ/kg]	entalpie pvs před vstřikem 2
$m_{vs2} =$	2,987	[kg/s]	množství napájecí vody pro vstřik 2

Výpočet teploty za vstřikem 2

Entalpie vstřiku je funkcí teploty t_3 , tlaku p_3 a poměru hmotnosti vzduchu k poměru vstřikované vody w_3 .

$$w_7 = \frac{m_{vs1} + m_{cp} + m_{vs2}}{m_7} \quad (5.16)$$

$$w_7 = \frac{0,1716 + 0,46 + 0,17}{2,987}$$

$$w_7 = 0,2684$$

kde:

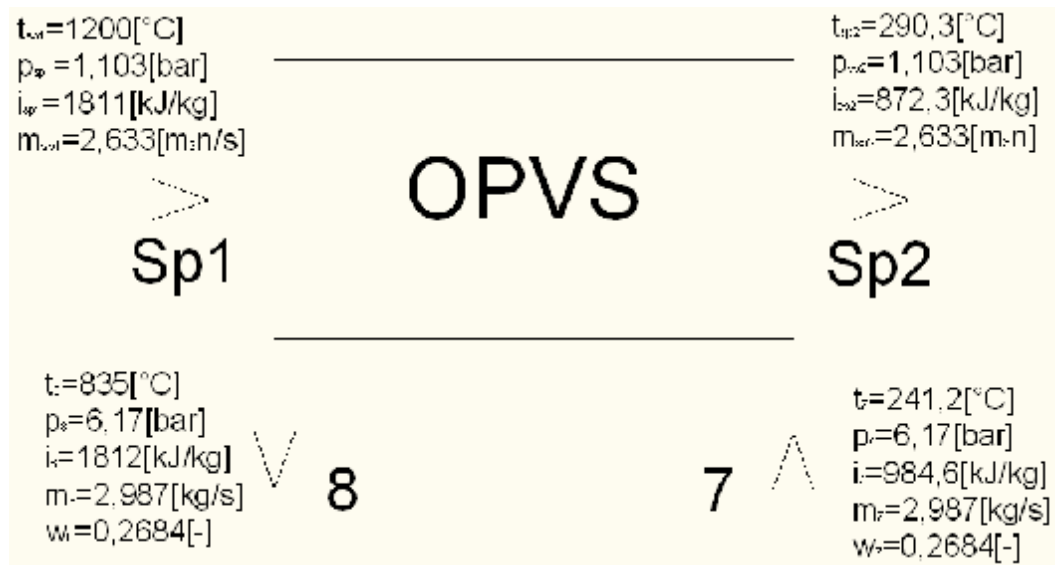
$m_7 =$	2,987	[kg/s]	množství pvs za vstřikem
$m_{vs1} =$	0,1716	[kg/s]	množství napájecí vody pro vstřik 1
$m_{cp} =$	0,46	[kg/s]	množství syté páry pro vstřik
$m_{vs} =$	0,17	[kg/s]	množství napájecí vody pro vstřik 2
$w_7 =$	0,2684	[-]	poměr páry v parovzduchové směsi za vstřikem 2.

Pokud je tedy známa entalpie i_7 , tlak p_7 a poměr w_7 , tak lze pomocí programu EES určit teplotu pvs za vstřikem 2.

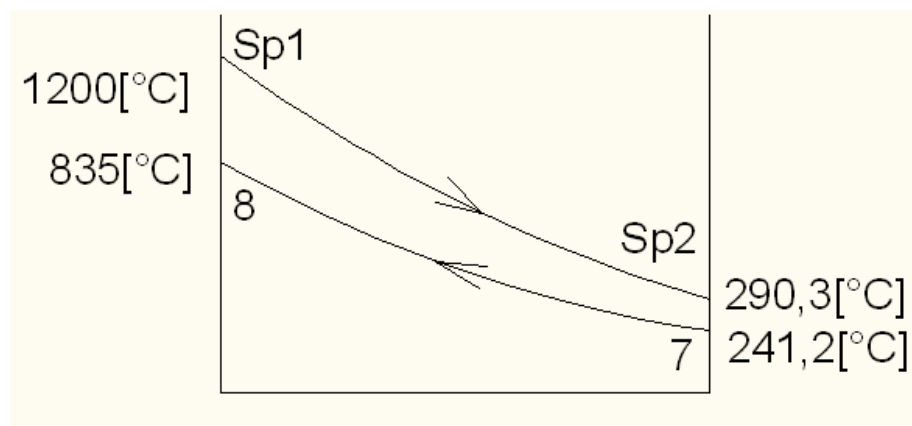
$$i_7 = 984,6 [\text{kJ/kg}], p_7 = 6,17 [\text{bar}] w_7 = 0,2684 [-] \Rightarrow t_7 = 241,2 [^\circ\text{C}]$$

5.7 Bilance ohříváku parovzduchové směsi OPVS

Při průchodu OPVS zvýší pvs svou celkovou entalpii před vstupem do turbíny. Parovzduchová směs je ohřátá na teplotu 835°C díky spalínám, které vycházejí ze spalovací komory. Bilance OPVS je na obrázku 5-8 a teplotní spád je na následujícím obrázku 5-9.



Obr. 5-8 - Balance OPVS



Obr. 5-9 - Teplotní spád OPVS

Výkon OPVS nutný k ohřátí pvs na požadované parametry

$$Q_{OPVS} = m_7 \cdot (i_8 - i_7) \quad (5.17)$$

$$Q_{OPVS} = 2,987 \cdot (1812 - 984,6)$$

$$Q_{OPVS} = 2471,44 \text{ kW}$$

kde:

$m_7 = 2,867$ [kg/s] množství pvs před spalínovým výměníkem

$i_7 = 984,6$ [kJ/kg] entalpie pvs před spalínovým výměníkem

$i_8 = 1812$ [kJ/kg] entalpie pvs za spalínovým výměníkem

Výpočet entalpie spalín na výstupu z OPVS

Entalpie spalín vstupu do OPVS byla vypočítána v kapitole 3.3.

$$Q_{OPVS} = m_{sp} \cdot (i_{sp1} - i_{sp2}) \Rightarrow i_{sp2} \quad (5.18)$$

$$i_{sp2} = i_{sp1} - \frac{Q_{OPVS}}{m_{sp}}$$

$$i_{sp2} = 1811 - \frac{2471,44}{2,633}$$

$$i_{sp2} = 1811 - \frac{2471,44}{2,633}$$

$$i_{sp2} = 872,34 \text{ kJ/kg}$$

kde:

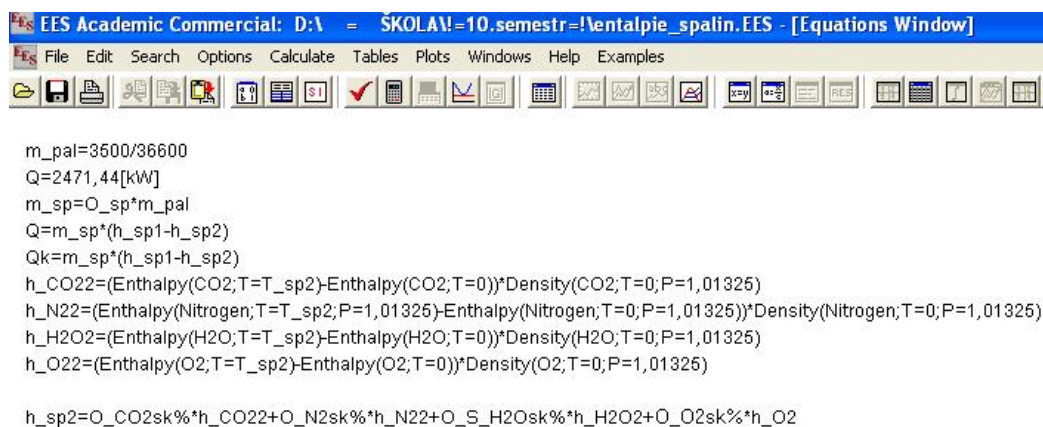
$m_{sp}=2,633$ [m³/s] množství pvs před spalínovým výměníkem

$i_{sp1}=1811$ [kJ/kg] entalpie pvs před spalínovým výměníkem

$i_{sp2}=872,34$ [kJ/kg] entalpie pvs za spalínovým výměníkem

Jestliže známe entalpii spalín na výstupu z OPVS můžeme pomocí programu EES vypočítat teplotu spalín. Vzorový výpočet je na obrázku 5-10

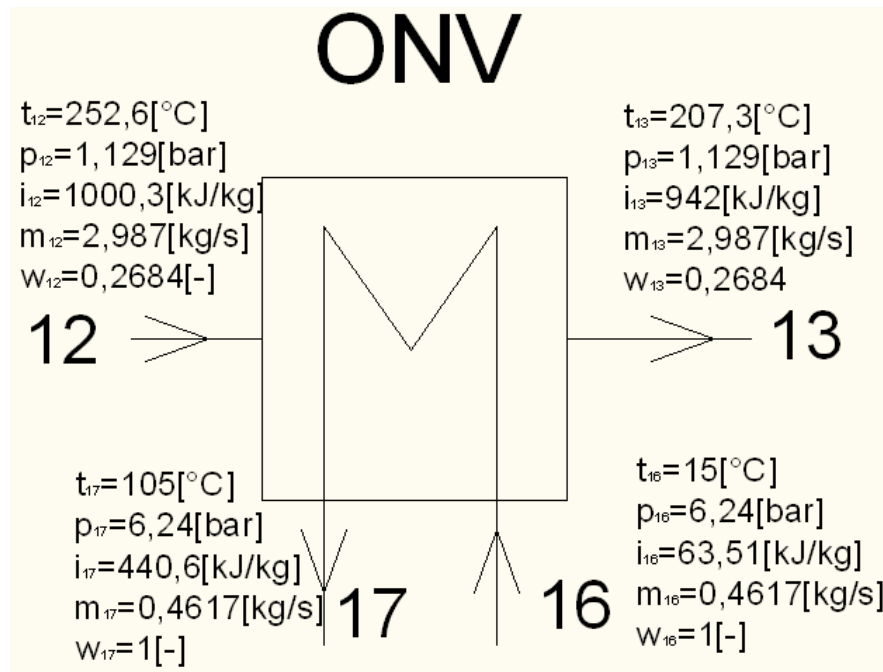
Entalpie na výstupu z OPVS je $t_{sp}=290,3^{\circ}\text{C}$,



Obrázek 5-10 - Výpočet entalpie spalin na výstupu z OPVS

5.8 Bilance ohříváku napájecí vody ONV

Výměník je určen k ochlazení pvs a ohřátí napájecí vody pro VS1 a VS2. Schéma ONV je na obrázku 5-11.



Obr. 5-11 - Balance ONV

kde:

$t_{12}=252,6$	$[^\circ\text{C}]$	teplota pvs před výměníkem
$p_{12}=p_{13}=1,129$	$[\text{bar}]$	tlak pvs před a za výměníkem
$w_{12}=w_{13}=0,2684$	$[-]$	podíl páry v parovzduchové směsi před a za výměníkem

Z výše uvedených parametrů a pomocí programu ESS je spočítána entalpie napájecí vody za a před ONV.

Navrženo:

$$t_{16}=15[^\circ\text{C}], p_{16}=6,24[\text{bar}] \Rightarrow i_{16}=63,51\text{kJ/kg}$$

$$t_{17}=105[^\circ\text{C}], p_{17}=6,24[\text{bar}] \Rightarrow i_{17}=440,6\text{kJ/kg}$$

Tepelná bilance

Z této tepelné bilance bude vypočítána entalpie i_{13} za výměníkem a z ní bude dopočítána teplota t_{13} z programu EES.

$$m_{12} \cdot (i_{12} - i_{13}) = m_{16} \cdot (i_{17} - i_{16}) \Rightarrow i_{13} \quad (5.19)$$

$$i_{13} = i_{12} - \frac{m_{16} \cdot (i_{17} - i_{16})}{m_{12}}$$

$$i_{13} = 1000,3 - \frac{0,4617 \cdot (440,6 - 63,15)}{2,987}$$

$$i_{13} = 942\text{kJ/kg}$$

kde:

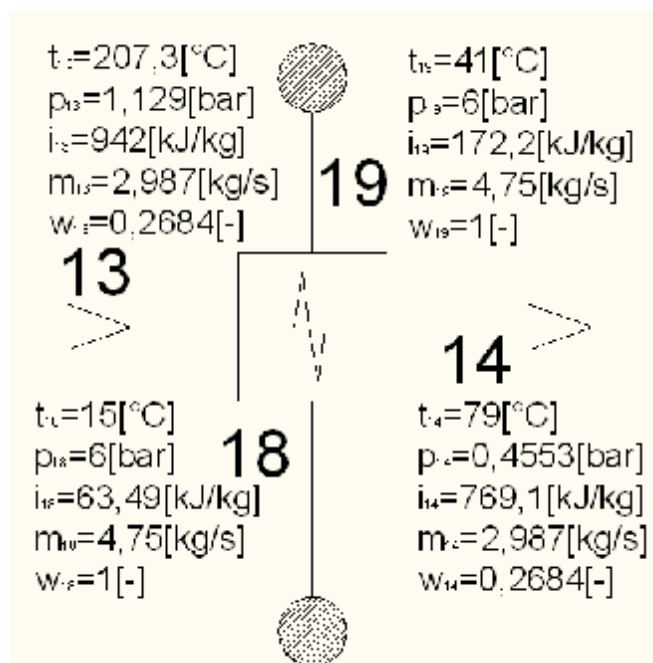
$i_{12} = 1000,3$	[kJ/kg]	entalpie pvs před ohřívákem napájecí vody
$i_{13} = 942$	[kJ/kg]	entalpie pvs za ohřívákem napájecí vody
$i_{17} = 440,6$	[kJ/kg]	entalpie napájecí vody za ohřívákem napájecí vody
$i_{16} = 63,15$	[kJ/kg]	entalpie napájecí vody před ohřívákem napájecí vody
$m_{13} = 2,987$	[kg/s]	množství pvs ze ReV.
$m_{16} = 0,4617$	[kg/s]	množství napájecí vody

Z vypočítaných parametrů mohu pomocí programu EES vypočítat teplotu pvs za výměníkem ReV.

$$i_{13} = 942 \text{ kJ/kg}, p_{13} = 1,129 \text{ bar}, w_{13} = 0,2684 \Rightarrow t_{13} = 207,3 [^{\circ}\text{C}]$$

5.9 Bilance dochlazovače

Pvs opouští dochlazovač s teplotou těsně nad bodem saturace. Ohřátá voda bude po dalším ohřevu použita jako teplá užitková voda a zbytek k vytápění nedalekých prostorů. Z bilance je vypočítáno kolik vody potřebuju k ochlazení pvs na teplotu 79°C , bilance je na obrázku 5-12.



Obr. 5-12 - Bilance dochlazovače

kde:

$t_{13} = 207,3$	[$^{\circ}\text{C}$]	teplota pvs před výměníkem
$t_{14} = 79$	[$^{\circ}\text{C}$]	teplota pvs za výměníkem

$p_{13}=p_{14}=1,129$	[bar]	tlak pvs před a za výměníkem
$t_{19}=41$	[°C]	teplota pvs před a za výměníkem
$w_{13}=w_{14}=0,2684$	[-]	poměr páry v parovzduchové směsi před a za výměníkem

Z výše uvedených parametrů a pomocí programu EES je spočítána entalpie napájecí vody za a před ONV a entalpie pvs za výměníkem při teplotě 79°C.

Navrženo:

$t_{14}=79[°C]$, $p_{14}=1,129[bar]$, $w_{14}=0,2684[-]$	\Rightarrow	$i_{14}=769,1\text{kJ/kg}$
$t_{18}=15[°C]$, $p_{16}=6[bar]$	\Rightarrow	$i_{18}=63,49\text{kJ/kg}$
$t_{19}=41[°C]$, $p_{17}=6[bar]$	\Rightarrow	$i_{19}=172,2\text{kJ/kg}$

Hmotnostní bilance

$$m_{13} \cdot (i_{13} - i_{14}) = m_{18} \cdot (i_{19} - i_{18}) \Rightarrow m_{18} \quad (5.20)$$

$$m_{18} = m_{13} \cdot \frac{(i_{13} - i_{14})}{(i_{19} - i_{18})}$$

$$m_{18} = 2,987 \cdot \frac{(942 - 769,1)}{(172,2 - 63,49)}$$

$$m_{18} = 4,75\text{kg/s}$$

kde

$i_{13}= 942$	[kJ/kg]	entalpie pvs za ohřívákem napájecí vody
$i_{14}= 769,1$	[kJ/kg]	entalpie pvs před separačním kondenzátorem
$i_{18}= 63,49$	[kJ/kg]	entalpie ohřívání vody na výstupu
$i_{17}= 172,2$	[kJ/kg]	entalpie ohřáté vody na vstupu
$m_{13}=2,987$	[kg/s]	množství pvs
$m_{18}=4,75$	[kg/s]	množství ohřívání vody

5.10 Závěr a zhodnocení bilance

Do výpočtu celkové bilance už jen stačí spočítat separační kondenzátor SeK, který budu konstrukčně navrhovat v následující kapitole, proto ho zde počítat nebudu.

Celé schéma FES je navrženo a v tabulce 5.1 najdete všechny hodnoty v jakémkoliv místě FES. V příloze číslo 1 můžete vidět celkové zapojení FES i s hodnotami ve všech uzlových bodech.

	t[°C]	p[bar]	m[kg/s]	i[kJ/kg]	w[-]
1	15	1,01325	3,463	30,95	0
2	266,3	6,24	3,463	289,5	0
3	266,3	6,24	2,185	289,5	0
4	96,62	6,24	2,357	300,5	0,07282
5	434	6,24	2,357	677,7	0,07282
6	360,2	6,17	2,817	1017	0,2242
7	241,2	6,17	2,987	984,6	0,2684
8	835	6,17	2,987	1812	0,2684
9	800	6,17	2,987	1760	0,2684
10	590,8	2,159	2,987	1457	0,2684
11	476,5	1,129	2,987	1298	0,2684
12	252,6	1,129	2,987	1000,3	0,2684
13	207,3	1,129	2,987	942,3	0,2684
14	79	1,129	2,987	769,1	0,2684
15	76,96	1,129	2,987	766,5	0,2684
16	15	6,24	0,4617	63,51	1
17	105	6,24	0,4617	440,6	1
18	15	6	4,75	63,49	1
19	41	6	4,75	172,2	1
VS1	105	6,24	0,1716	440,6	1
VS2	105	6,24	0,17	440,6	1
cp	160,4	6,241	0,46	2758	1
	t[°C]	p[bar]	m[kg/m_N³]	i[kJ/kg]	
sp1	1200	0,101325	2,633	1811	
sp2	290,9	0,101325	2,633	872,7	

Tabulka 5.1 – Přehled parametru ve všech uzlových bodech FES

6. VÝPOČTOVÝ PROJEKT SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU

Z důvodu ochrany duševního vlastnictví firmy VÍTKOVICE a.s. budou následující kapitoly v souladu s pokyny pro zpracování diplomové práce, uvedené v příloze číslo 2. V této kapitole budu navrhovat separační kondenzátory, kde bude ochlazované médium chlazené vodou nebo vzduchem.

7. OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ SEPARAČNÍHO KONDENZÁTORU I PŘI NIŽŠÍM VÝKONU DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKY

Pro ověření chování separačního kondenzátoru při nižších výkonech musí být známa velikost teplosměnné plochy. Jak jsem již uvedl, a.s. CHV Praha mi nemohla poskytnout potřebné materiály. Vzhledem k tomu mohu provést jen diskuzi.

7.1 Separační kondenzátor chlazený vzduchem

Protože množství chladícího vzduchu se při sníženém výkonu FES nezmění, lze předpokládat, že se dosáhne nižší teploty pvs na výstupu, případně se bude moci odstavit skrápění vodou, čímž se sníží vlastní spotřeba elektřiny.

7.2 Separační kondenzátor chlazený vodou

Při snížení výkonu FES se sníží průtok pvs přes SeK sníží se tedy i potřebný chladicí výkon. Může se tedy snížit průtok chladicí vody, čímž se opět dosáhne snížení vlastní spotřeby elektrické energie.

8. ZÁVĚR

Obsah mé diplomové práce spočívá v seznámení s FES a s jeho širokým využitím v praxi. V práci jsem navrhoval a počítal bilanci FES pro spalování fosilních paliv. Bilance byla provedena hmotnostně i tepelně pro celý systém. Dále práce obsahuje veškeré potřebné výpočty pro výpočet parametrů parovzduchové směsi a spalin zemního plynu.

V poslední části diplomové práce jsou uvedeny výpočtové projekty a v přílohách nakresleny tři různé typy separátorů kondenzátu.

FES se jeví jako nový moderní energetický systém, který po svém vývoji může být využit jak u klasických elektrárenských provozů tak s v provozech s kogenerací.

Výhody FES jsou zejména ve zvyšování celkové účinnosti transformace primární energie a tím dosažené redukci produkce škodlivin a CO₂.

Pro FES je zřejmě vyhovující Separační kondenzátor (SeK) s chlazením vzduchem, typ s odlučováním v jednotlivých trubkách bude zřejmě vhodný pro malé jednotky, typ cyklonového odlučovače pak pro větší jednotky.

9. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha číslo 1. Schéma Flexibilního energetického systému
- Příloha číslo 2. Kapitola číslo 6 - Výpočtový projekt separačního kondenzátoru
- Příloha číslo 3. Sestava separačního odlučovače s mikrochladičem
- Příloha číslo 4. Schéma separačního odlučovače
- Příloha číslo 5. Sestava cyklónového odlučovačem s mikrochladičem
- Příloha číslo 6. Sestava chladiče chlazeného vodou

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vilimec, L., Stárek, K.: FES – Flexibilní energetický systém se zvýšenou účinností transformace primární energie tuhých i alternativních paliv a tepla odpadních spalin. VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., 2009.
- [2] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků 1. vyd. Praha : ČVUT, 1999. 176 s. 83 obr. ISBN 80-01-02035-5. ČVUT: Fakulta strojní, Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení 1999
- [3] Milčák, P.: Termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi., VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., 2009.
- [4] Katalogové listy - CHLADÍCÍ VĚŽE PRAHA, a.s.